

## 小形高性能自律移動体用電池の特性評価

田 村 洋 一<sup>※</sup>Characteristics of Rechargeable Batterys  
for High Performance Autonomous Vehicles

TAMURA Yoichi

## 緒 言

自律移動体であるロボットや搬送車などの駆動源として電池と電気モータの組み合わせがよく利用される。その容量は用途により大きく変わるが、ここでは比較小容量のシステムを高性能に動作させる自律移動システムを対象に考える。したがって動力源として充電可能な二次電池を搭載したシステムを想定している。

電池の性能としては、軽量でありかつ高容量で所定の電流を供給できることが必要条件となる。ここでは電池が小形であることはあまり要求しない用途を想定している。すなわち電池を収納する体積は十分あるような場合である。実験対象として小形軽量で市販されている密閉形ニッケル・カドミウム電池、ニッケル・水素電池、リチウムイオン電池の3種類を選択した。これらの電池に関する定性的な性質はすでに公表<sup>1,2,3)</sup>されているが、実際に小形高性能な自律移動体システムを設計できるほどの詳細データは公表されていない。そこで各々の電池について内部抵抗や最大放電電流値を評価し、その適切な用途先が明確になるように性能評価試験を実施したので報告する。

## 1. 電池の一般的特性

ニッケル・カドミウム電池が発明されたのは約100年前であるが、一般に普及したのは密閉化技術が開発されたことで進展した。しかもすでに50年近くの歴史があり、技術的には確立されており現状以上の性能向上はあまり期待できないであろう。

水素吸蔵合金を負極に用いたニッケル水素電池は、水素が高性能電池の負極として適していること、水素吸蔵合金は水素吸蔵量が多いため小形化が可能であることで最近携帯用電子機器の電源として多く利用されるようになってきた。また電圧値や放電カーブの形状がニッケル・カドミウム電池と同じなので互換性がある。

リチウムイオン電池は負極材料としてリチウムを用いたものであり、質量エネルギー密度、体積エネルギー密度がいずれも高いので、最近の携帯用電子機器に多く利用されている。

各種二次電池の性能比較として、横軸に体積エネルギー密度(Wh/L)を縦軸に質量エネルギー密度(Wh/kg)とり図示したものを図1に示す<sup>1)</sup>。体積エネルギー密度、質量エネルギー密度がともに大きな値を示すものが小形でありかつ軽量であることを示す。この観点からは、リチウムイオン電

※ 機械工学科情報制御工学コース教授

2000年6月8日受付

表1 二次電池の性能比較<sup>1)</sup>

		ニッケル・カドミウム電池	ニッケル水素電池	リチウムイオン電池
放電特性	電圧 (V/セル)	1.2	1.2	3.6
	大電流放電性能	容量低下は少ない	容量低下は少ない	容量低下あり
	自己放電 (%/日)	1	1	0.3~0.6
	サイクル寿命	500	500	500
	耐過放電性	優れている	やや劣る	劣る
	メモリ効果	ある	あるがニッケル・カドミウムより少ない	ない
耐衝撃性		強い (金属ケース)	強い (金属ケース)	強い (金属ケース)
貯蔵性		長期貯蔵でも問題ない	長期貯蔵でも問題ない	6ヶ月ごとに補充電必要

池、ニッケル水素電池、ニッケル・カドミウム電池の順になることは明らかである。

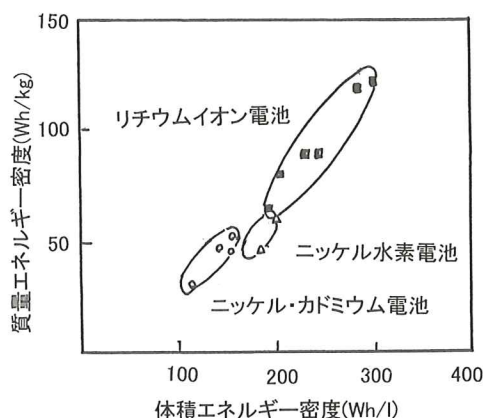
電池の他の性能を定性的に比較したものを表1に示す<sup>1)</sup>。それぞれ電池特有の特徴があり、エネルギー密度だけで電池を選択することができないことがうかがえる。

そこで高性能自律移動体に要求される主な性能を起動トルクが大きいことと高速走行が可能であることと想定して、放電可能最大電流と内部抵抗を評価できる実験を行った。

## 2. 試験した電池の仕様と充放電方法

### 2.1 試験した電池の仕様

電池の試験サンプルは、公称電圧7.2Vのサンプルに統一した。すなわちニッケル・カドミウム電池とニッケル水素電池は6個直列に接続したものを、リチウムイオン電池は2個直列に接続したも

図1 試験した二次電池の性能比較<sup>1)</sup>

のを使用した。その主な仕様を表2に示す。公称容量はカタログ値をそのまま記載している。重量は電池単体の重量を実測し、公称容量値を用いて質量エネルギー密度を算出した。体積エネルギー密度に関しては電池の実装方法により大きく変化

表2 実験に使用した電池の主仕様

サンプルNo.	1	2	3	4	5
電池種類	ニッケル・カドミウム電池		ニッケル水素電池		リチウムイオン電池
公称容量 mAh (Wh)	1700mAh (12.24Wh)	2400mAh (17.28Wh)	2200mAh (15.84Wh)	2700mAh (19.44Wh)	1350mAh (9.72Wh)
重量 (g)	345	375	365	242	95
エネルギー密度	35.5Wh/kg	46.1Wh/kg	43.4Wh/kg	80.3Wh/kg	102.3Wh/kg

\* 重量は試験サンプルを実測した。\*\*公称容量 (Wh) は公称容量 (Ah) × 公称電圧 (V) で計算した。

することが想定されるので、今回は評価していない。

## 2.2 充電方法

充電方法は公表されている方法で行った<sup>2)</sup>。充電回路の構成を図2に示す。定電圧直流電源と直列に試験用電池、定電流回路を接続する。定電流回路の電流はパソコンから設定できる。電池電圧と充電電流値をパソコンに入力することが可能である。初期の充電電流値は公称容量値 (mAh) に対して1時間率で充電する値に設定した。すなわちNa1電池では公称容量が1700mAhであるから、初期の充電電流は1700mAに設定する。ニッケル・カドミウム電池とニッケル水素電池については常に定電流で充電し、次の条件を満たしたとき充電終了と判断した。ニッケル・カドミウム電池については、30秒ごとに電圧値を測定し、電圧上昇値 (今回の電圧値－前回の電圧値) < -5 mV で充電完了とした。ニッケル水素電池については12秒ごとに電圧値を測定し、電圧上昇値 < 0 で充電完了とした。リチウムイオン電池については推奨充電方法のうち定電流定電圧充電法を採用した。最初は公称容量値の1時間率の定電流値で充電し、電池電圧が8.4Vを越えたら充電電流値を徐々に減少させる方法である。具体的には3秒ごとに電池電圧を測定し、その値が8.4Vを越えたら充電電流値を50mA減少させる。電池には内部抵抗があるので、充電電流を減少させると電池電圧も8.4V

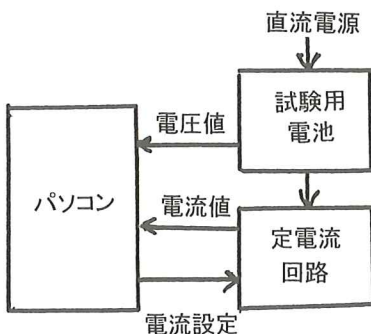


図2 試験電池の充電回路構成

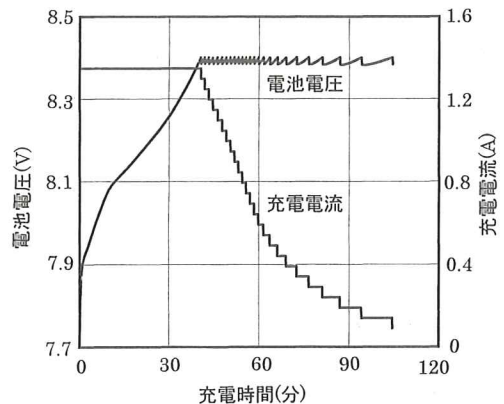


図3 リチウムイオン電池を充電するときの電圧、電流の変化状況

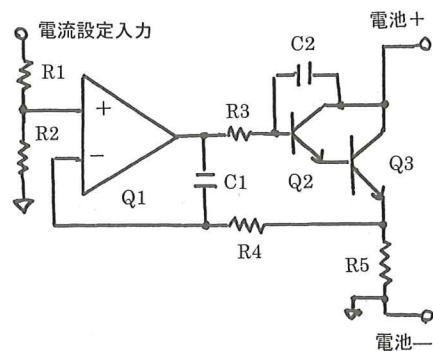


図4 定電流放電回路（最大12.5A）

以下になる。再び電池電圧が8.4Vを越えたらさらに50mA減少させる。これを繰り返し充電電流が0.1A以下になったら充電完了とした。サンプル番号Na5のリチウムイオン電池を充電しているときの電池電圧、充電電流の時間変化状況を図3に示す。

## 2.3 放電方法

電池内部抵抗の測定は、放電電流を変化させながら電池電圧の降下量を測定することで実施している。また電池の諸特性を測定するには、電池の放電電流を計算機から自由に設定することが望ましい。そのために図4に示す定電流放電回路を製作した。抵抗R5の電圧降下により放電電流を



測定する。設定電圧と等しくなるまで演算増幅器 Q1 により放電電流を制御する。この動作により設定電圧に比例した電流で電池を放電することができる。本回路はほぼ直流的に動作し高速応答の必要がないので、抵抗 R4 とコンデンサ C1, C2 を挿入し負帰還回路の発振を防止している。抵抗 R5 は  $0.1\Omega$  50W の抵抗を使用し、図 4 に示した回路にて最大 12.5 A まで流すことができるように設計した。放電電流の最大値の目標を 50 A と設定したので、図 4 の回路を 4 回路並列に接続し 1 つの電圧信号で放電電流を設定している。

相当大きな電流を流すので電池からの導線を 2 線式にすると導線抵抗の影響を受けるので、電池のすぐそばのコネクタからは 4 線式の導線を採用し、電流導線と電圧測定用導線を設けた。電池からコネクタまでの導線長さは約 50 mm である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 充電完了直後の電池内部抵抗と放電可能最大電流

充電完了直後に短時間にどれだけの電流が流せるかを測定した。放電電流を順次増加させて電池の電圧を測定した。この結果から電池の内部抵抗を算出している。ニッケル・カドミウム電池の結果を図 5 に、ニッケル水素電池の結果を図 6 に、リチウムイオン電池の結果を図 7 に示す。図 5 に示すようにニッケル・カドミウム電池は 50 A の短期間放電を行っても問題がなかった。ニッケル水素電池は質量エネルギー密度の高い方 (No. 4) が大きな電流を流すことができなかった。図 6 の最大電流以上では、電池電圧が大きく低下する状況を示したので、この現象が発生する直前までのデータを示した。最大電流として約 36 A (No. 3) と約 20 A (No. 4) 流せたが、電圧降下も大きいので実用上はそれぞれ 20 A 以下、10 A 以下で使用可能と思われる。リチウムイオン電池については約 5.4 A 以上では電池内臓の保護回路が動作して、電圧出力はほぼゼロになる。市販のリチウムイオン電

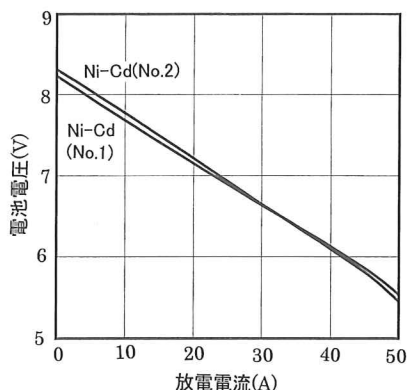


図 5 ニッケル・カドミウム電池の短期放電特性 (充電直後)

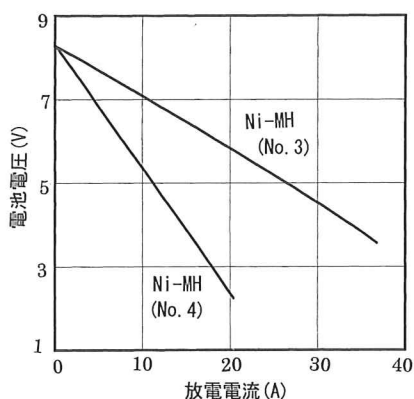


図 6 ニッケル水素電池の短期放電特性 (充電直後)

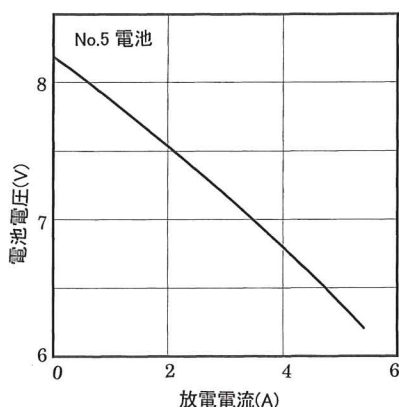


図 7 リチウムイオン電池の短期放電特性 (充電直後)

表3 各電池の内部抵抗（充電直後）

サンプルNo.	1	2	3	4	5
電池種類	ニッケル・カドミウム電池		ニッケル水素電池		リチウムイオン電池
内部抵抗 (Ω)	0.0515	0.0521	0.128	0.298	*0.36, 0.35, 0.35 ** (0.30)

\*：3個の電池について測定 \*\*：電池内臓の保護回路を外したとき

池はすべて保護回路が内臓されているようである。

図5から図7までの実測結果は、放電電流の大きさにほぼ比例して電池電圧が低下している。この実測結果から最少自乗法にて直線を求め、その勾配を内部抵抗とした。その結果を表3に示す。ニッケル・カドミウム電池の内部抵抗は他の電池の約1/2から1/6である。このことから大電流を流すためには、ニッケル・カドミウム電池を使用せざるを得ない。質量エネルギー密度が大きいほど大きな電流を流すことができない傾向にある。したがって移動体の加速が緩やかで大電流をそれほど流す必要がない用途にはニッケル水素電池、リチウムイオン電池の順で使用可能であろう。

### 3.2 連続放電中での内部抵抗の変化

電池を連続放電している間に内部抵抗がどのように変化するかを測定した。測定方法は1時間率の電流（1 C電流）で連続放電を行っている途中で上記と同じ方法で内部抵抗の測定を実施した。

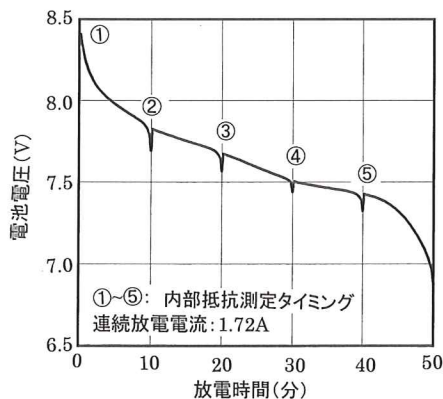


図8 ニッケル・カドミウム電池連続放電時の電池電圧変化

内部抵抗を測定するタイミングは充電直後と1時間率の電流で放電を開始後10分、20分、30分と10分間隔で測定を実施した。ただしリチウムイオン電池については、15分間隔で測定した。ニッケル・カドミウム電池（No.1）について放電中の電池電圧の変化を図8に示す。また内部抵抗の計算結果を図9と表4に示す。図8において内部抵抗を測定するときに電池電圧が不連続になるのは、内部抵抗を測定するときは放電を一時中止するので、電池電圧が少し戻るためである。しかし全体の放電曲線は連続で放電したときと大きく変化することはない。図9と表4の内部抵抗の変化については、充電直後は内部抵抗が少し大きく、放電曲線が緩やかに変化する領域では内部抵抗が小さくなっている。また放電完了近くになると内部抵抗は上昇する。放電初期においては少し内部抵抗が大きいのが電池電圧も高いので応用上問題になることは少ないであろう。

ニッケル水素電池については、図6の短期放電

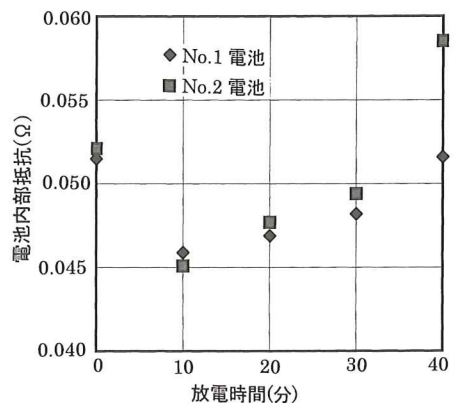


図9 ニッケル・カドミウム電池の内部抵抗変化（放電電流：1 C A）

表4 ニッケル・カドミウム電池内部抵抗の放電中の変化

測定タイミング	内部抵抗値 ( $\Omega$ )	
	No.1 電池	No.2 電池
充電直後	0.0515	0.0521
10分間放電後	0.0459	0.0451
20分間放電後	0.0469	0.0477
30分間放電後	0.0482	0.0494
40分間放電後	0.0516	0.0585

連続放電電流値：No.1 電池1.7A No.2 電池2.4A

特性から判断して質量エネルギー密度の高いNo.4電池は実使用が難しいと判断してNo.3電池のみ試験した。その結果を図10に示す。放電時間に対する内部抵抗の変化はニッケル・カドミウム電池と同じ傾向である。内部抵抗値がニッケル・カドミウム電池に比べて約2倍である。内部抵抗値が表3の値と異なるが、その理由は以下の通りである。表3の内部抵抗値は図6の実験結果から計算しており、No.3電池については放電電流が最大35A以上である。一方図10の結果は放電電流を0Aから10Aまで変化させてそのときの電圧降下の実測値を最少自乗法で直線近似して内部抵抗を求めている。図6の結果から判るよう電流値が大きくなると電圧降下の割合が大きくなっているためである。

リチウムイオン電池の内部抵抗変化の状況を図

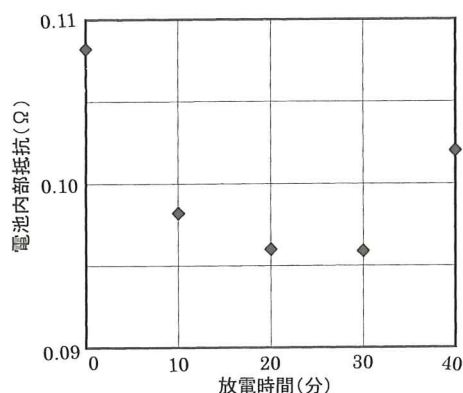


図10 ニッケル水素電池の内部抵抗変化 (サンプルNo.3, 放電電流1C A)

11に示す。放電時間に対する変化はニッケル・カドミウム電池、ニッケル水素電池と同様であるが、内部抵抗値がニッケル・カドミウム電池の約6倍、ニッケル水素電池の約3倍である。電池容量が少し小さいので以上のような直接比較は厳密でないが、電池容量を加味しても内部抵抗が大きい傾向であるため大電流を流す用途には不向きである。

### 3.3 放電電流を変化させたときの放電特性

大きな電流値を連続的に流したときの放電時間に対する電池電圧の変化を求めた。大電流を流せば当然内部抵抗による発熱で電池温度が上昇するとともに化学反応が通常の小電流放電と異なる可能性があり、電池の機能を果たさなくなることも考えられる。

試験する電池をほぼ完全に放電したのち、充電電流1C Aで充電を行った。実際の方法は2.2で述べた方法である。充電が完了した直後に放電特性を測定した。放電電流は1C Aから最大6C Aまで変化させ、定電流で放電を行った。放電の終了は電池電圧が6V以下になるまで30秒間隔でデータを採取した。

ここで1Cとは、電池容量 (mAh) を1時間で放電するような電流を流すときの状態をいう。したがってニッケル・カドミウム電池No.1については公称容量が1700mAhであるから、1Cとは放電

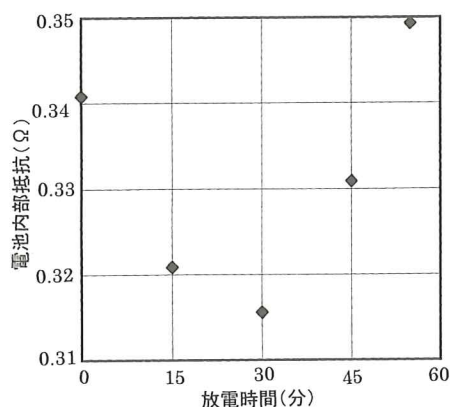


図11 リチウムイオン電池の内部抵抗変化 (サンプルNo.5, 放電電流1C A)



電流を1.7Aに設定した状態である。2CとはNo.1電池では放電電流を3.4Aに設定したことになる。

ニッケル・カドミウム電池（No.1電池）について、放電電流を2Cから6Cまで変化したときの電池電圧の変化状況を図12に示す。放電電流を増加させると電池内部抵抗により電池電圧は低下するが、放電時間は放電電流値にほぼ反比例して減少しているの、電池内部で問題が生じているとは考えにくい。したがってより大きな電流での放電が可能であろう。

ニッケル水素電池（No.3電池）に関しては、放電電流2Cから4Cまで測定した。その結果を図13に示す。放電電流を増加していくと内部抵抗が大きいため電池の電圧降下が大きく、電流変化に対して電池電圧変動が大きいので大電流放電に関しては、ニッケル・カドミウム電池に比べて不利になることは間違いない。また4C（No.3電池では8.8A）で連続放電を行ったとき、放電開始後約2.5分で電池電圧がほぼゼロになり放電不可能になった。したがって連続放電電流は最大で3C程度と考えられる。ニッケル水素電池No.4は質量エネルギー密度がNo.3電池の約2倍あるが内部抵抗が2倍以上あるので、大電流放電には不向きと判断して実験を行っていない。

リチウムイオン電池について放電電流を1C、2Cに設定したときの放電特性を図14に示す。この結果はリチウム電池に内蔵されている保護回路を外した状態でやっている。3Cで放電したとき、放電開始後3分弱で電池電圧が1V以下に急激に降下したため放電を中止した。その後1Cで放電すると正常な放電を行えたので、3Cの放電電流では電池内部で化学変化が発生し放電不可能になったものと思われる。リチウムイオン電池は質量エネルギー密度が一番高い電池であるが、この結果から判断すると大電流での放電用途には不向きであると判断できる。

### 3.4 放電中の電池の温度上昇

連続放電中の電池の温度上昇も重要な要素である。ニッケル水素電池には温度測定用サーミスタ

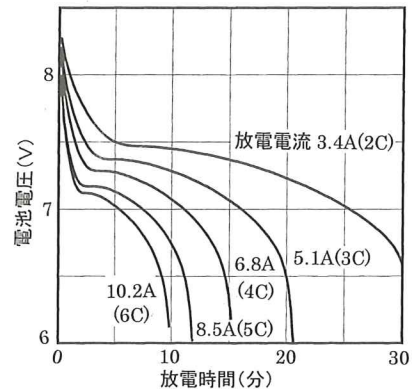


図12 ニッケル・カドミウム電池の放電特性  
(放電電流：2C～6C)

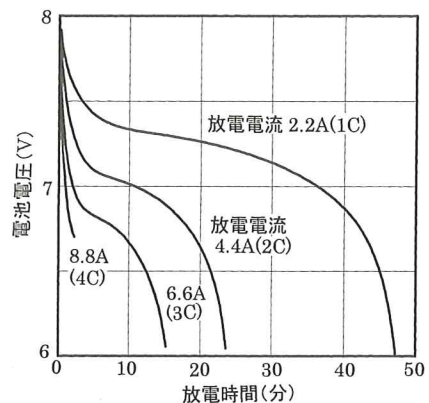


図13 ニッケル水素電池の放電特性  
(放電電流：1C～4C)

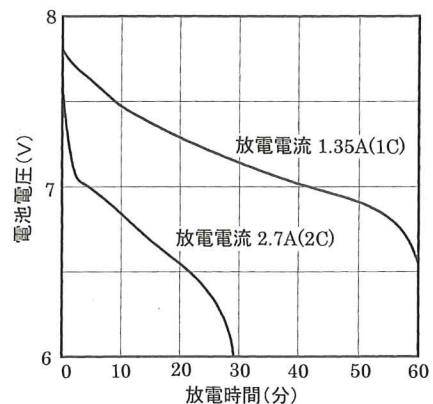


図14 リチウムイオン電池の放電特性  
(放電電流：1C～2C)

が付属していたので、サーミスタの抵抗値を白金測温抵抗体 (Pt100) で校正し、電池温度を求めた。ニッケル・カドミウム電池、リチウムイオン電池に関しては薄膜の白金測温抵抗体 (Pt100) を電池の外側に貼り付け温度測定を実施した。

ニッケル・カドミウム電池に関する測定結果を図15に示す。6 C A (10.2 A) で連続放電を行っても約20°Cの温度上昇であるので、常温雰囲気中での使用であれば問題ない温度上昇値である。ニッケル水素電池の実験結果を図16に示す。3 C A (6.6 A) の連続放電でも温度上昇は13°C以下と少ない。リチウムイオン電池の実験結果を図17に示すが、2 C A (2.7 A) の連続放電電流でも約30°Cの温度上昇が実測されている。この結果からもリチウムイオン電池に関しては、2 C A程度が最大放電電流値と考えられる。

#### 4. 結 論

小形で高性能な自律移動体用の電源として、市販の3種類の2次電池について性能比較を行った。電池に要求される性能としたは、①軽量であること ②大電流が流せることを評価項目として実験を行った。その結果ニッケル・カドミウム電池は質量エネルギー密度が一番小さいが、電池内部抵抗が低く大電流を流すのに適しており、大きな加速を必要とする自律移動体用の電源として適している。リチウムイオン電池は質量エネルギー密度が一番大きい、大きな電流を流すには適していないので、小電流で長い時間使用する用途の電源に適している。したがって軽量とともに小形が要求される自律移動体用に適した電池といえる。ニッケル水素は両者の中間の性能を示す。

#### 5. 謝 辞

今回の実験を実施する機会を与えていただくとともにその結果を評価していただいた、(株)テクトロン 吉岡社長、(株)スカイリモート 岡部社長および住金制御エンジニアリング(株) 森チーム長に

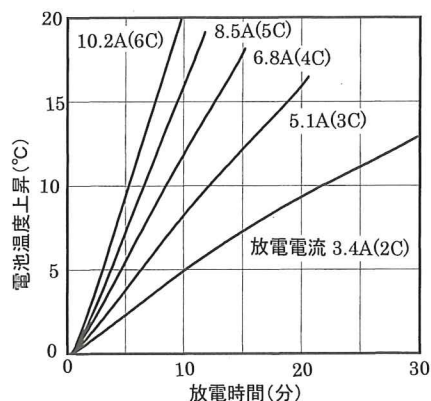


図15 ニッケル・カドミウム電池の温度上昇

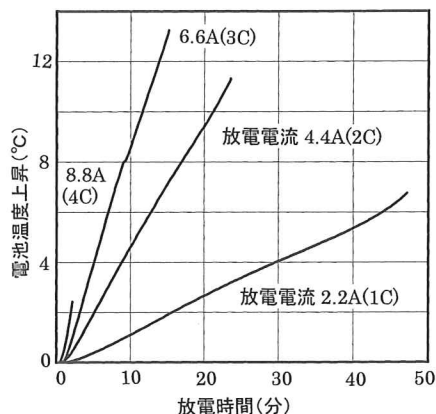


図16 ニッケル水素電池の温度上昇

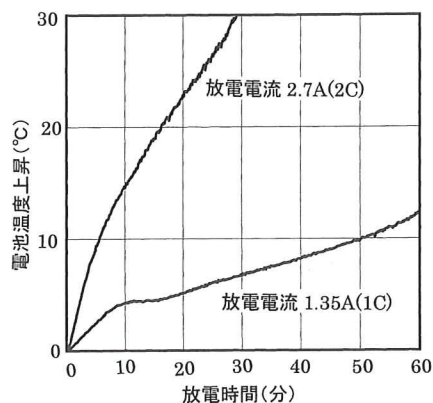


図17 リチウムイオン電池の温度上昇



深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本電池株式会社編：最新実用二次電池 その  
選び方と使い方，日刊工業新聞社（1995）
- 2) 芳尾真幸，小沢昭弥：リチウムイオン二次電池，  
日刊工業新聞社（1996）
- 3) 板生 清監修：ウェアラブル情報機器の実際，  
オプトロニクス社（1999）